

شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان، احتراق و انتقال حرارت در کوره دوار سیمان صنعتی: تحلیل اثر مومنتوم هوای اولیه بر آیرودینامیک و ساختار شعله

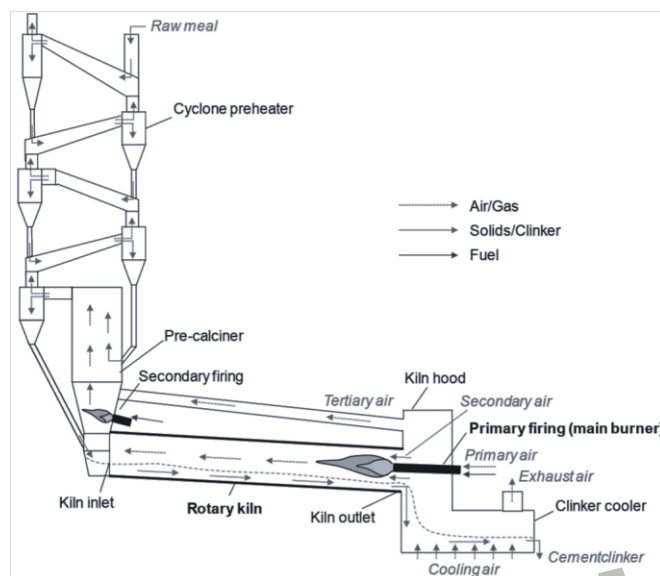
چکیده

کوره‌های دوار نقش چشمگیری در تولید سیمان دارند و عملکرد آن‌ها مستقیماً بر کیفیت محصول، مصرف انرژی و انتشار آلاینده‌ها تأثیر می‌گذارد. فرآیند پخت مواد خام در این کوره‌ها نیازمند انتقال حرارت پیچیده (هدایت، جابجایی و تشعشع) حاصل از جریان گازهای داغ مشعل است. به دلیل دمای بسیار بالا و محدودیت‌های فیزیکی، اندازه‌گیری‌های تجربی درون کوره با چالش‌های اساسی مواجه است. از این رو، دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) به عنوان ابزاری توانمند و دقیق برای درک و بهینه‌سازی این فرآیندهای پیچیده شناخته می‌شود. در این پژوهش، میدان جریان، احتراق غیرپیش‌آمیخته و انتقال حرارت درون یک کوره دوار سیمان به صورت سه‌بعدی در نرم‌افزار آنسیس فلوئنت ۲۰۲۵ شبیه‌سازی شده است. معادلات حاکم با بهره‌گیری از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ استاندارد و مدل تشعشع مختصات گسسته (DO-Discrete Ordinates) حل شده و نتایج با داده‌های تجربی معتبر اعتبارسنجی گردید که تطابق مطلوبی را نشان داد. به منظور ارزیابی حساسیت آیرودینامیک شعله، علاوه بر حالت پایه، دو سناریو شامل $\pm 20\%$ تغییر در دبی هوای اولیه تحلیل شد. نتایج نشان داد که این تغییرات دبی، مستقیماً مومنتوم جت هوا و قدرت نفوذ شعاعی آن به درون هسته سوخت را اصلاح می‌کند؛ به طوری که بیشینه سرعت جریان از ۱۹۱ تا ۲۷۱ متر بر ثانیه تغییر یافت. این کنترل آیرودینامیکی شدت اختلاط و موقعیت ناحیه آزاد سازی حرارت را جابجا می‌کند. در حالت پایه، بیشینه دمای گاز حدود ۲۴۰۰ کلوین است. افزایش ۲۰ درصدی هوای اولیه با تقویت اختلاط، موجب گسترش ناحیه داغ به پایین‌دست و کاهش نسبی بیشینه دما می‌شود، در حالی که کاهش دبی هوا، انرژی و گرادیان‌های حرارتی را در مجاورت مشعل متمرکز می‌سازد. تحلیل میدان گونه‌ها نیز ثابت کرد که افزایش هوای اولیه به دلیل ارتقای نرخ اختلاط، منجر به کاهش بیشینه CO و بهبود راندمان احتراق می‌شود. متقابلاً، کاهش هوا باعث افت مومنتوم، طولانی شدن هسته سوخت CH_4 (تا فاصله ۶-۵ متری) و تشدید احتراق ناقص موضعی می‌گردد. یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد که تنظیم دقیق مومنتوم هوای اولیه، اهرمی کلیدی برای کنترل یکنواختی حرارتی، پایداری شعله و کاهش آلاینده‌ها بوده و می‌تواند مبنایی برای توسعه سامانه‌های هوشمند بهره‌برداری در کوره‌های دوار صنعتی باشد.

کلمات کلیدی: دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)؛ کوره دوار سیمان؛ احتراق غیرپیش‌آمیخته؛ آیرودینامیک شعله؛ انتقال حرارت تشعشعی؛ مومنتوم هوای اولیه.

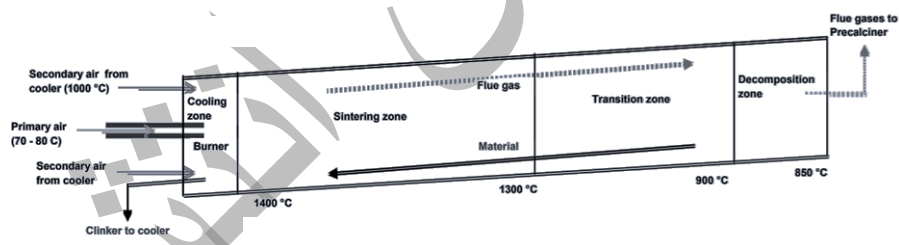
۱-مقدمه

صنعت سیمان به عنوان یکی از ارکان زیر ساخت‌های جهانی، با تولید سالانه بیش از ۴ میلیارد تن، نقشی حیاتی در توسعه ایفا می‌کند [۱]. با این حال، این مقیاس تولید عظیم، چالش‌های زیست‌محیطی و انرژی قابل توجهی را به همراه دارد. فرآیند تولید کلینکر سیمان، با شدت انرژی بالا (حدود ۲۸۰۰ مگاژول بر تن)، مسئول نزدیک به ۸ درصد از کل انتشار دی‌اکسید کربن (CO_2) در جهان است [۲]. کانون اصلی این مصرف انرژی و انتشار آلاینده‌ها، کوره دوار است؛ ابعاد این کوره‌ها در محدوده ۲ تا ۶ متر قطر و ۵۰ تا ۲۲۵ متر طول قرار داشته و جرم عملیاتی آن‌ها می‌تواند تا ۳۰۰۰ تن نیز برسد. دو کاربرد اصلی این کوره‌ها در صنعت شامل تولید سیمان و تولید آهن اسفنجی است [۳]. کوره دوار سیمان از یک پوسته‌ی استوانه‌ای فولادی با آستر نسوز داخلی تشکیل شده است. دوران کوره (حداکثر ۳/۵ دور بر دقیقه) همراه با شیب محوری ۳ تا ۴ در صد، شرایط لازم برای انتقال تدریجی خوراک خام به سمت خروجی را ایجاد می‌کند. برای دستیابی به تشکیل کلینکر سیمان، دمای مواد در داخل کوره باید به بیش از ۱۷۰۰ کلوین برسد، که لازمه انجام واکنش‌های کلسیناسیون است. بهره‌وری حرارتی این فرآیند به شدت به یک سیستم یکپارچه وابسته است که شامل پیش‌گرم‌کن‌های سیکلونی، کلاسیفر، کوره دوار و خنک‌کننده شبکه‌ای می‌شود. این تجهیزات به ترتیب وظایف پیش‌گرمایش و تجزیه خوراک خام، واکنش‌های حرارتی و پخت کلینکر و نهایتاً خنک‌سازی محصول را پوشش می‌دهند [۴]. در این سیستم (شکل ۱)، خوراک خام پیش از ورود به کوره، در پیش‌گرم‌کن و کلاسیفر با استفاده از گازهای داغ خروجی از کوره، بخش قابل توجهی از فرآیند تجزیه کربنات کلسیم را طی می‌کند. پس از پخت در کوره، کلینکر داغ وارد خنک‌کننده شبکه‌ای شده و حرارت بازیافتی از آن به شکل هوای ثانویه داغ، مجدداً به فرآیند احتراق در مشعل اصلی تزریق می‌شود [۵]. این تعامل پیچیده بین انتقال حرارت، سینتیک واکنش‌های شیمیایی و دینامیک سیالات، بهینه‌سازی عملکرد کوره را به یک چالش مهندسی چندوجهی تبدیل کرده است.



شکل ۱- شماتیکی از فرآیند تولید کلینکر سیمان شامل پیش گرم کن، کلساینر، کوره دوار و خنک کننده کلینکر [۶].

محیط ترمو شیمیایی داخل کوره دوار به دلیل اندرکنش پیچیده‌ی پدیده‌های انتقال و واکنش‌های شیمیایی، شرایط بسیار چالش برانگیزی را برای تحلیل و بهینه سازی ایجاد می‌کند. انرژی حرارتی مورد نیاز برای تشکیل کلینکر، از احتراق سوخت‌های فسیلی در یک م‌شعل تأمین می‌گردد. جریان‌های هوای اولیه (محوری و چرخشی با دمای حدود ۷۰-۸۰ درجه سانتی‌گراد) و هوای ثانویه (با دمای حدود ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد از خنک‌کننده) یک الگوی آیرودینامیکی بسیار پیچیده در نزدیکی مشعل ایجاد می‌کنند که مستقیماً شکل شعله، نرخ اختلاط سوخت و هوا و در نتیجه، پروفیل انتقال حرارت را تعیین می‌کند. انتقال حرارت به بستر مواد، از طریق مکانیزم‌های ترکیبی جابجایی و تشعشع صورت می‌گیرد که در دماهای بالای کوره، تشعشع از گازهای داغ (عمدتاً CO_2 و H_2O) و ذرات معلق، مکانیزم غالب است. این پروفایل دمایی غیر یکنواخت در طول کوره، منجر به تقسیم‌بندی آن به نواحی عملکردی متمایز می‌شود. همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، مواد خام با عبور از مناطق تجزیه (Calcination)، انتقال (Transition)، سینترینگ (Sintering) و خنک‌سازی، دستخوش یک سری واکنش‌های شیمیایی پیچیده و تغییر فاز می‌شوند تا در نهایت چهار جزء اصلی کلینکر (C_2S ، C_3S ، C_4AF و C_3A) تشکیل گردند [۷]. درک دقیق این میدان‌های سه‌بعدی دما، سرعت و غلظت گونه‌های شیمیایی برای بهینه‌سازی مصرف سوخت و کاهش آلاینده‌ها ضروری است.



شکل ۲- روند تکامل فازهای کلینکر و پروفایل‌های دمایی گاز و مواد در طول محور کوره دوار [۷]

کوره‌های دوار سیمان به دلیل پیچیدگی‌های فیزیکی شامل جریان‌های چندفازی، واکنش‌های شیمیایی متعدد و انتقال حرارت تشعشعی، همواره یکی از چالش برانگیزترین سیستم‌ها برای مدل سازی با دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) بوده‌اند. تحقیقات پیشین در این حوزه را می‌توان مطالعات متمرکز بر سوخت‌های جایگزین و مدل‌های احتراق پیشرفته، پژوهش‌های معطوف به تحلیل پارامترهای عملیاتی و هندسی و تحقیقات مرتبط با بستر مواد و مدل‌های کوپل‌شده (اندرکنش فازهای جامد و گاز) درون کوره تقسیم کرد.

بخش بزرگی از تحقیقات اخیر به بررسی امکان استفاده از سوخت‌های جایگزین (Alternative Fuels) مانند سوخت‌های مشتق از زباله (RDF/SRF) و زیست‌توده، و همچنین فناوری‌های نوین مانند احتراق اکسی-سوخت (Oxy-fuel Combustion) برای کاهش همزمان هزینه‌ها و اثرات زیست‌محیطی اختصاص یافته است. مطالعاتی مانند کار پیپر و همکاران [۶] و هرکوگ [۸] و همکاران نشان داده‌اند که جایگزینی سوخت‌های فسیلی با RDF امکان‌پذیر است، اما چالش‌هایی نظیر احتراق کندتر، تغییر شکل شعله و تأثیر بر کیفیت کلینکر را به همراه دارد. سسیلیو و همکاران [۹] نیز با مدل سازی اولر-لاگرانژ به این نتیجه رسیدند که مشخصات فیزیکی سوخت جایگزین (اندازه ذرات، رطوبت و خاکستر) نقش تعیین‌کننده‌ای در بازده احتراق دارد. در همین راستا، مطالعات دیتارناتو و همکاران [۱۰] و وانگ و همکاران [۱۱] پتانسیل احتراق اکسی-سوخت را برای دستیابی به احتراق پایدارتر و کامل‌تر بررسی کردند، هرچند به چالش کنترل دمای یکنواخت و افزایش تولید NO_x در نسبت‌های اکسیژن بالا نیز اشاره نمودند.

گروه دیگری از پژوهش‌ها بر تحلیل تأثیر پارامترهای طراحی و عملکردی بر میدان‌های ترمو-شیمیایی درون کوره تمرکز کرده‌اند. العطار [۱۲] به طور مشخص نشان داد که پارامترهای مشعل مانند نسبت هوای اولیه، هندسه و توان، تأثیر مستقیمی بر دمای بی‌شینه شعله و توزیع شار حرارتی بر دیواره دارند. ویرتز و همکاران [۱۳] اهمیت مدل سازی دقیق لایه‌های پوششی (Coating) را برجسته کردند و نشان دادند که ضخامت و یکنواختی این لایه‌ها می‌تواند الگوی جریان

گاز و پروفیل دما را به شدت تغییر دهد. مطالعاتی مانند کار استراتمن و همکاران [۱۴] حتی به اجزای جانبی مانند فن‌های خنک‌کننده پوسته پرداخته و تأثیر آن‌ها بر مقاومت حرارتی و بازده کلی سیستم را مدل‌سازی کرده‌اند. این پژوهش‌ها، صحت و حساسیت نتایج CFD را به انتخاب مدل‌های فیزیکی مناسب، مانند مدل‌های آشفتگی ($k-\epsilon$ realizable, $k-\omega$ SST)، تشعشع (P-1, DO) و احتراق (PDF, PaSR)، پیوند می‌زنند، همانطور که در تحلیل مقایسه‌ای نویندگانی و همکاران [۱۵] به تفصیل بررسی شده است.

در کنار مطالعات فاز گاز، مدیریت حرارتی و دینامیک بستر مواد نیز مورد توجه بوده است. ندای و همکاران [۱۶] با استفاده از مدل سیمین، به شبیه‌سازی پروفیل بستر مواد و زمان ماند پرداختند. شاهین و همکاران [۱۷] فرآیند تولید آهک را با رویکرد بهبود راندمان حرارتی مدل‌سازی کردند و سیامه و همکاران [۱۸] از مدل‌های انتقال حرارت مزدوج برای ارزیابی توزیع حرارت بهره بردند. تلاش‌ها برای کوپل کردن فاز گاز و جامد نیز منجر به توسعه مدل‌های هیبریدی شد؛ مانند کار رایان و همکاران [۱۹] که یک مدل CFD دوبعدی را با مدل یک‌بعدی بستر کوپل کردند، و مطالعه آلکاید-مورنو و همکاران [۲۰] که با توسعه یک مدل سه‌بعدی برای یک کوره ۶۴ متری، مسیر حرکت ذرات سوخت جایگزین را شبیه‌سازی کردند، هرچند در این مطالعه نیز بستر کلینکر با تخصیص یک پروفیل دمایی ثابت، ساده‌سازی شده بود.

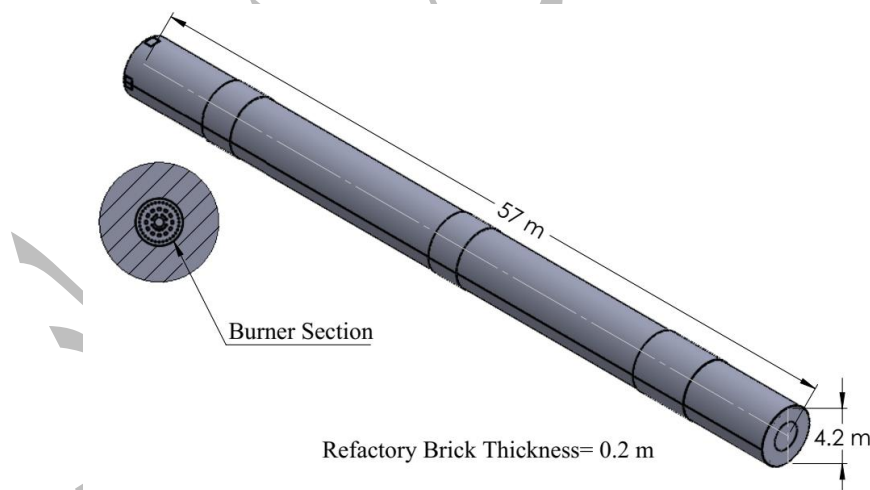
با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در مدل‌سازی CFD کوره‌های دوار، اکثر مطالعات بر روی تغییرات بزرگ طراحی (مانند نوع سوخت یا هندسه) متمرکز شده‌اند. با این حال، یک خلأ مشخص در زمینه تحلیل حساسیت کمی و سه‌بعدی میدان‌های ترموشیمیایی نسبت به تغییرات پارامترهای کنترلی کلیدی در شرایط عملیاتی واقعی یک کوره صنعتی وجود دارد. به عبارت دیگر، تأثیر تنظیمات روزمره و قابل کنترل مانند تغییرات دبی و متعاقباً مومنتوم آیرودینامیکی هوای اولیه مشعل بر الگوی اختلاط، رفتار شعله، توزیع دما و غلظت گونه‌ها به صورت جامع مدل‌سازی نشده است.

بنابراین، هدف اصلی این تحقیق، شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی فرآیند احتراق و انتقال حرارت در یک کوره دوار سیمان در مقیاس صنعتی واقعی و بررسی کمی اثر تغییر ۲۰ درصدی دبی هوای اولیه بر عملکرد آن است. تمرکز ویژه این مطالعه بر درک چگونگی تأثیر تغییرات مومنتوم جت هوا بر آیرودینامیک جریان، نفوذپذیری گونه‌ها و ساختار احتراق در رژیم سوخت‌غنی است که نتایج آن می‌تواند مستقیماً برای بهینه‌سازی بهره‌برداری، افزایش راندمان انرژی و کاهش آلایندگی در واحدهای صنعتی مورد استفاده قرار گیرد.

۲- مدل‌سازی فیزیکی و ریاضی

۲-۱- مشخصات هندسی

در این مطالعه عددی، هندسه کوره دوار براساس یک واحد صنعتی با ظرفیت ۱۰۰۰ تن در روز کلینکر مدل‌سازی شد. کوره دارای طول ۵۷ متر و قطر داخلی ۴/۲ متر (ضخامت لایه آجر نسوز داخلی ۰/۲ متر) است. در مدل این کوره، در انتهای ورودی یک مقطع باز بزرگ برای ورود جریان هوای ثانویه از ناحیه خنک‌کننده در نظر گرفته شده که مشعل نیز در مرکز این ناحیه قرار دارد. در انتهای خروجی (محل خروج گازها و ورود کلینکر) نیز یک مرز خروج آزاد برای گاز تعریف شد. هندسه کوره به صورت استوانه‌ای در نظر گرفته شده و دیواره‌ها به‌عنوان مرز جامد لحاظ شدند. در شکل ۳ هندسه این کوره نشان داده شده است.



شکل ۳- شماتیک دامنه محاسباتی سه‌بعدی مورد استفاده در شبیه‌سازی

۲-۲- فرضیات

در شبیه‌سازی عددی کوره‌های دوار سیمان، به دلیل پیچیدگی بالای پدیده‌های فیزیکوشیمیایی شامل انتقال حرارت، واکنش‌های احتراقی و جریان‌های آشفته، اعمال فرضیات ساده‌کننده اجتناب‌ناپذیر است. این فرضیات با هدف بهینه‌سازی هزینه محاسباتی و تسهیل همگرایی مدل، ضمن حفظ ماهیت فیزیکی مسئله و دقت نتایج، اتخاذ شده‌اند. فرضیات اصلی حاکم بر مدل حاضر به شرح زیر است:

- جریان پایا و چگالی متغیر: جریان به صورت پایا (Steady-state) فرض شده است. همچنین، به دلیل سرعت پایین جریان (عدد ماخ بسیار کوچک)، جریان از منظر تغییرات فشار تراکم‌ناپذیر فرض شده است، اما برای لحاظ کردن اثرات انبساط حرارتی، چگالی مخلوط گازی بر اساس قانون گاز ایده‌آل (Ideal Gas Law) وابسته به دما محاسبه می‌شود.

- اثرات شناوری (Buoyancy): به دلیل وجود گرادیان‌های دمایی بسیار شدید در هندسه کوره، شتاب گرانش در معادلات بقای مومنتوم جهت لحاظ کردن اثرات شناوری اعمال شده است.
- شرایط مرزی خروجی گاز: در مرز خروجی گاز (مقطع ورود خوراک خام به کوره)، شرط مرزی فشار نسبی برابر صفر (Zero Gauge Pressure) اعمال شده و از مکش سیستم پیش گرم کن صرف نظر شده است.
- خواص فیزیکی همسانگرد: خواص ترموفیزیکی گازها در تمامی نقاط دامنه مستقل از جهت و همسانگرد (Isotropic) فرض شده‌اند.
- عدم چرخش کوره (Stationary domain): هندسه کوره به صورت کاملاً ساکن مدل سازی شده است. از آنجا که دامنه محاسباتی محدود به فضای آزاد گاز روی بستر مواد است و سرعت چرخش کوره بسیار پایین (حدود ۳ تا ۵ دور بر دقیقه) می باشد، در مقایسه با سرعت بالای گاز خروجی از مشعل، اثر چرخش بر میدان جریان سیال ناچیز بوده و قابل چشم پوشی است.
- واکنش های فاز جامد: واکنش های گرماگیر و گرمازای درون بستر مواد (مانند کلسیناسیون نهایی سنگ آهک و تغییرات ترکیب شیمیایی کلینکر) نادیده گرفته شده‌اند و تمرکز مدل بر احتراق و انتقال حرارت فاز سیال است.
- لایه پوششی دیواره (Coating layer): شبیه سازی کوره بدون در نظر گرفتن تشکیل لایه پوششی بر روی دیواره های داخلی نسوز انجام شده است؛ این یک فرض متداول و استاندارد در اکثر مطالعات CFD کوره های دوار است.

۲-۳- معادلات حاکم

در این مطالعه، جریان سیال، انتقال حرارت و فرآیند احتراق درون کوره دوار سیمان با رویکرد اویلری و از طریق حل معادلات ناویر-ستوکس با میانگین گیری رینولدز (RANS) مدل سازی شده است. با توجه به اینکه تمرکز اصلی بر فاز گاز و توزیع حرارت ناشی از شعله است، از مدل سازی فاز ذرات (کلینکر) صرف نظر شده و اثرات آن به صورت شرایط مرزی در نظر گرفته شده است. فرآیند به صورت پایا و جریان با چگالی متغیر فرض شده است. برای کوپلینگ سرعت و فشار از الگوریتم SIMPLE استفاده شده و اثرات آشفتگی با مدل $k - \epsilon$ استاندارد ارزیابی می گردد. معادلات حاکم بر میدان شامل بقای جرم، مومنتوم، انرژی و انتقال گونه های شیمیایی به شرح زیر است:

معادله بقای جرم:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0$$

معادله بقای مومنتوم:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V} \otimes \vec{V}) = -\nabla p + \nabla \cdot \left[\mu_{eff} \left(\nabla \vec{V} + (\nabla \vec{V})^T - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{V} \vec{I} \right) \right] + \rho \vec{g}$$

که در آن ρ چگالی، $\vec{V}$ بردار سرعت، p فشار استاتیک و $\vec{g}$ شتاب گرانش است که برای اعمال اثرات شناوری لحاظ شده است. لزجت مؤثر $\mu_{eff} = \mu + \mu_t$ مجموع لزجت دینامیکی و لزجت آشفتگی می باشد.

معادله بقای انرژی:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V} H) = \nabla \cdot \left(\left(\frac{k_t}{C_p} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \nabla H \right) + S_{rxn} + S_{rad}$$

در این معادله، H آنتالپی کل، k_t هدایت حرارتی، C_p ظرفیت گرمایی ویژه و Pr_t عدد پرانتل توربولانت است. ترم های S_{rad} و S_{rxn} به ترتیب نشان دهنده گرمای آزاد شده ناشی از واکنش های شیمیایی احتراق و انتقال حرارت تشعشعی هستند. برای مدل سازی تشعشع، با توجه به ضخامت اپتیکی بالای گازهای احتراقی، از مدل مختصات گسسته (Discrete Ordinates - DO) استفاده شده است.

معادله انتقال گونه های شیمیایی و احتراق:

احتراق سوخت (گاز طبیعی) به صورت غیرپیش آمیخته (Non-premixed) در نظر گرفته شده و توزیع گونه های گازی با حل معادله انتقال زیر برای هر گونه (i) به دست می آید:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V} Y_i) = \nabla \cdot \left(\left(\rho D_i + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \nabla Y_i \right) + R_i$$

که در آن Y_i کسر جرمی گونه، D_i ضریب نفوذ جرمی و Sc_t عدد اشمیت توربولانت است. ترم R_i نرخ خالص تولید یا مصرف گونه i در واکنش های شیمیایی است. با توجه به اینکه در کوره های صنعتی نرخ واکنش توسط نرخ اختلاط سیال آشفته محدود می شود، برای محاسبه R_i از مدل اتلاف گردابه ای (Eddy Dissipation Model - EDM) استفاده شده است.

۲-۳-۱-مدل سازی آشفته‌گی

جریان گاز در کوره‌های دوار، به‌ویژه در ناحیه مشعل که اختلاط شدید سوخت و هوا رخ می‌دهد، کاملاً آشفته است. برای مدل سازی این ویژگی، از مدل آشفته‌گی $k - \epsilon$ استاندارد استفاده شد که به دلیل پایداری بالا و هزینه محاسباتی معقول، مدلی رایج و معتبر در شبیه‌سازی کوره‌های صنعتی محسوب می‌شود. معادلات انتقال برای انرژی جنبشی آشفته‌گی (k) و نرخ اتلاف آن (ϵ) به شرح زیر است:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V} k) = \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + G_k - \rho \epsilon$$

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V} \epsilon) = \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k}$$

که در آن لزجت آشفته‌گی (μ_t) و نرخ تولید انرژی جنبشی آشفته‌گی (G_k) از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

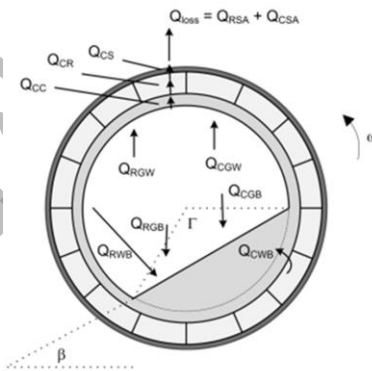
$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$$

$$G_k = \mu_t (\nabla \vec{V} + (\nabla \vec{V})^T) : \nabla \vec{V}$$

ثوابت مدل آشفته‌گی نیز بر اساس مقادیر استاندارد به صورت $C_\mu = 0.09$, $C_{1\epsilon} = 1.44$, $C_{2\epsilon} = 1.92$, $\sigma_k = 1.0$ و $\sigma_\epsilon = 1.3$ تنظیم شده‌اند. در نهایت، کوپلینگ سرعت و فشار با استفاده از الگوریتم SIMPLE انجام پذیرفت.

۲-۳-۲-مکانیزم‌های انتقال حرارت و مدل تشعشع

انتقال حرارت در کوره دوار سیمان یک فرآیند پیچیده و چندگانه است. همان‌طور که در شماتیک فیزیکی شکل ۴ نشان داده شده است، مقطع عرضی کوره در واقعیت از یک پوسته فولادی، لایه آجر نسوز، لایه پوشش و بستر کلینکر تشکیل می‌شود. مکانیزم‌های اصلی انتقال حرارت در این سیستم شامل انتقال حرارت جابجایی و تشعشع از گازهای داغ احتراق به دیواره داخلی و بستر کلینکر، انتقال حرارت تشعشعی متقابل بین دیواره و بستر مواد، هدایت حرارتی از طریق لایه‌های نسوز و پوسته فولادی، و در نهایت اتلاف حرارت به محیط بیرون از طریق جابجایی (طبیعی و اجباری) و تشعشع می‌باشد. شایان ذکر است که در شبیه‌سازی حاضر، اثرات حرارتی بستر مواد و لایه‌های دیواره از طریق شرایط مرزی معادل (توضیح داده شده در بخش شرایط مرزی) در دامنه محاسباتی فاز گاز اعمال شده‌اند.



شکل ۴- شماتیک مکانیزم‌های انتقال حرارت چندگانه در مقطع عرضی یک کوره دوار سیمان، شامل تشعشع، جابجایی و هدایت بین گاز احتراق، بستر مواد، دیواره‌های نسوز و محیط اطراف

با توجه به دماهای بسیار بالای شعله و گازهای احتراق در ناحیه پخت، تشعشع حرارتی مکانیزم غالب در انتقال انرژی محسوب می‌شود. از آنجا که محیط سیال (گازهای حاصل از احتراق) امواج الکترومغناطیسی را جذب و منتشر می‌کند، برای پیش‌بینی دقیق توزیع دما و شارهای حرارتی، حل معادله انتقال تشعشع (Radiative Transfer Equation - RTE) الزامی است. معادله RTE برای شدت تابش I در موقعیت فضایی $\vec{r}$ و جهت $\vec{s}$ به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{dI(\vec{r}, \vec{s})}{ds} + (a + \sigma_s)I(\vec{r}, \vec{s}) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s} \cdot \vec{s}') d\Omega'$$

در این رابطه، $I(\vec{r}, \vec{s})$ شدت تابش، a ضریب جذب (Absorption coefficient)، σ_s ضریب پراکندگی (Scattering coefficient)، n ضریب شکست (Refractive index)، T دمای محلی گاز، σ ثابت استفان-بولتزمن و s طول مسیر است. همچنین Φ تابع فاز پراکندگی و Ω' زاویه فضایی را نشان می‌دهد. برای حل معادله (۱۶) در این مطالعه، از مدل مختصات گسسته استفاده شده است. این مدل، معادله انتقال تشعشع را در زوایای فضایی گسسته‌شده حل کرده و قابلیت کوپلینگ کامل با معادلات جریان و انرژی را داراست. با توجه به استفاده از سوخت گاز طبیعی و عدم حضور فاز ذرات معلق پراکنده‌کننده (مانند خاکستر

زغال سنگ) در دامنه محاسباتی فاز گاز، از اثرات پراکندگی صرف نظر شده و ضریب پراکندگی ($\sigma_s = 0$) فرض گردید. برای گسسته سازی زاویه ای، دامنه فضایی به مش های زاویه ای 2×2 (برای هر دو زاویه قطبی و سمتی θ و ϕ) تقسیم شد که دقت مناسبی برای شبکه های سه بعدی فراهم می کند. ضریب جذب گاز (a) نیز به صورت تابعی از ترکیب در صد گونه های جاذب (نظیر CO_2 و H_2O) و دما، با استفاده از مدل مجموع وزنی گازهای خاکستری (WSGGM) محاسبه گردید.

۴-۲- شرایط مرزی

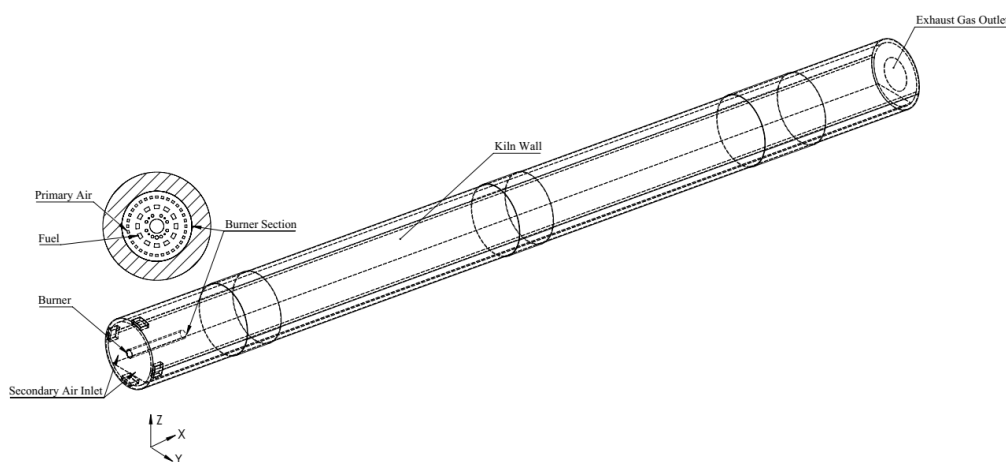
برای شبیه سازی فرآیند احتراق در کوره دوار سیمان، شرایط مرزی به گونه ای تعریف شد که بیشترین تطابق با شرایط عملیاتی واقعی را داشته باشد. ورودی سوخت به صورت گاز طبیعی هم دما با محیط با دمای $13^\circ C$ درجه سانتیگراد معادل با 286 کلوین با دبی جرمی 0.99 کیلوگرم بر ثانیه مطابق با توان حرارتی مشعل تعیین گردید و در نرم افزار به صورت شرط مرزی دبی جرمی ثابت (Mass Flow Inlet) اعمال شد. هوای اولیه (دبی هوای فن مشعل) 6250 مترمکعب بر ساعت هم دما با محیط با دمای $13^\circ C$ درجه سانتیگراد معادل 286 کلوین با ترکیب حجمی O_2 21% و N_2 79% وارد کوره شد و شرط مرزی اعمال شده برای آن، ورودی سرعت (Velocity Inlet) است. جریان هوای ثانویه که وظیفه اصلی تأمین اکسیژن احتراق و بازیافت حرارت از خنک کننده (Cooler) را بر عهده دارد، با دبی 35000 نرمال مترمکعب بر ساعت و دمای بالای 1273 کلوین از ناحیه حلقوی اطراف مشعل وارد کوره می شود. این مرز نیز با شرط ورودی سرعت (Velocity Inlet) مدل سازی شد تا اثرات انتقال حرارت جابجایی و اختلاط توربولانسی در ناحیه شکل گیری شعله به دقت شبیه سازی گردد. مقطع کل ورودی ها به گونه ای کالیبره شده است که بقای جرم و ممنتوم در سیستم تضمین شود. در انتهای کوره (محل خروج گازهای احتراقی به سمت پیش گرم کن)، شرط مرزی خروجی فشار (Pressure Outlet) با فشار نسبی صفر (فشار مرجع 1 اتمسفر) در نظر گرفته شد. خلاصه ای از پارامترهای عملیاتی حالت پایه در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- شرایط عملیاتی و مرزی حالت پایه مورد استفاده در شبیه سازی CFD

ردیف	پارامتر	مقدار	واحد
۱	نوع سوخت	گاز طبیعی	
۲	دبی جرمی سوخت (کیلوگرم بر ثانیه)	0.99	کیلوگرم بر ثانیه
۳	دبی حجمی هوای اولیه (مترمکعب بر ساعت)	6250	مترمکعب بر ساعت
۴	دبی حجمی هوای ثانویه (نرمال مترمکعب بر ساعت)	35000	نرمال مترمکعب بر ساعت

دیواره های کوره به عنوان سطوح بدون لغزش (No-slip walls) تعریف شدند و لایه نسوز داخلی به عنوان یک مانع حرارتی برای انتقال حرارت تابشی و جابجایی لحاظ گردید. اثر گرانش در راستای عمودی با $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ اعمال شد و بستر کلینکر به صورت منطقه بلوکه شده (Blocked-off region) مدل سازی گردید تا تعامل بین فاز گاز و جامد و انتقال حرارت به درستی شبیه سازی شود. در این تحقیق مشعل براساس ورودی هوا و سوخت مدل شد و سطح مقطع کل ورودی ها به گونه ای تنظیم شد که حفظ جرم و مومنوم جریان تضمین گردد.

دیواره های داخلی کوره با شرط عدم لغزش (No-slip condition) تعریف شدند. همچنین، لایه نسوز داخلی به عنوان یک مقاومت حرارتی در برابر انتقال حرارت شعاعی و جابجایی در نظر گرفته شد. بستر کلینکر در پایین کوره از دامنه سیال حذف شده (Excluded volume) و سطح آن به عنوان یک مرز جامد مدل سازی گردید تا تعامل حرارتی (Heat transfer coupling) بین فاز گاز و سطح بستر به درستی لحاظ شود. شتاب گرانش زمین ($g = 9.81 \text{ m/s}^2$) در راستای عمودی برای در نظر گرفتن اثرات شناوری حرارتی فعال گردید. طرحواره دامنه محاسباتی و مرزهای تعریف شده در شکل ۵ نشان داده شده است.



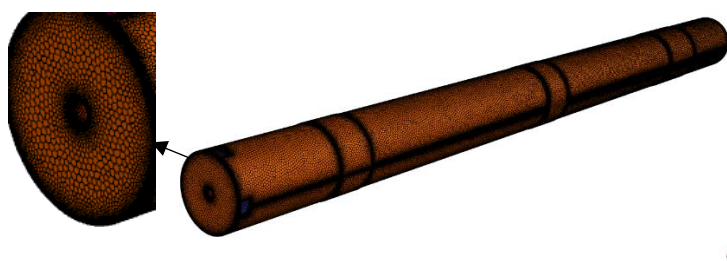
شکل ۵- نمای سه بعدی دامنه محاسباتی و جانمایی شرایط مرزی شامل ورودی سوخت، هوای اولیه، هوای ثانویه در مقطع مشعل و خروجی گازهای احتراقی.

علاوه بر شبیه‌سازی حالت پایه (Base case)، به منظور ارزیابی حساسیت فرآیند احتراق نسبت به تغییرات هوای اولیه مشعل، دو سناریوی عملیاتی دیگر نیز تعریف و شبیه‌سازی شدند. در این سناریوها، دبی هوای اولیه به طور سیستماتیک میزان ۲۰ درصد افزایش و ۲۰ درصد کاهش نسبت به مقدار مرجع تغییر یافت. در طول این تحلیل حساسیت، سایر شرایط مرزی (شامل دبی سوخت، دبی و دمای هوای ثانویه، و هندسه کوره) کاملاً ثابت نگه داشته شدند. این رویکرد، امکان تحلیل دقیق اثر تک‌متغیره هوای اولیه بر پایداری شعله، الگوی اختلاط آیرودینامیکی، توزیع سه‌بعدی دما و میدان غلظت گونه‌های شیمیایی را فراهم می‌آورد.

۲-۵- شبکه‌بندی و حل عددی

۲-۵-۱- تولید شبکه محاسباتی

برای شبیه‌سازی دقیق فرآیند احتراق در کوره دوار سیمان، شبکه‌بندی هندسه به دقت بالایی انجام شد. در این مطالعه از شبکه موزاییک (Hybrid Mesh) شامل ترکیبی از المان‌های مکعبی و شش وجهی استفاده گردید. در نواحی مجاور دیواره‌ها، ۱۵ لایه مرزی با ضخامت 0.1 میلی‌متر اعمال شد تا گرادیان‌های سرعت، دما و شار حرارتی به صورت دقیق مدل‌سازی شوند. برای بهینه‌سازی زمان محاسبات و افزایش سرعت همگرایی، اندازه سلول‌ها در ناحیه مشعل بسیار ریز در نظر گرفته شد تا جزئیات شعله و اختلاط سوخت و هوا به خوبی شبیه‌سازی شوند، در حالی که در ورودی هوای ثانویه اندازه سلول‌ها بزرگتر و با چگالی کمتر انتخاب شد. همچنین اندازه سلول‌ها به صورت تدریجی در طول کوره افزایش یافت تا انتقال حرارت و جریان گاز در تمام طول کوره به صورت پایدار و با دقت کافی حل شود. توجه ویژه به نحوه ورود هوای فن مشعل به عنوان هوای اولیه، که به صورت ترکیبی از جریان محوری و چرخشی (شعاعی) وارد کوره می‌شود، باعث شد تا اثرات توربولانس و اختلاط سوخت و هوا در ناحیه شعله با دقت بیشتری شبیه‌سازی شود. این روش شبکه‌بندی امکان بررسی دقیق توزیع دما، پروفیل‌های سرعت و غلظت گونه‌های شیمیایی و پیش‌بینی انتقال حرارت به بستر کلینکر را فراهم می‌آورد. در شکل ۶ هندسه شبکه‌بندی شده آورده شده است.



شکل ۶ - نمای کلی از شبکه محاسباتی سه‌بعدی (Poly-Hexcore) تولید شده برای کوره دوار

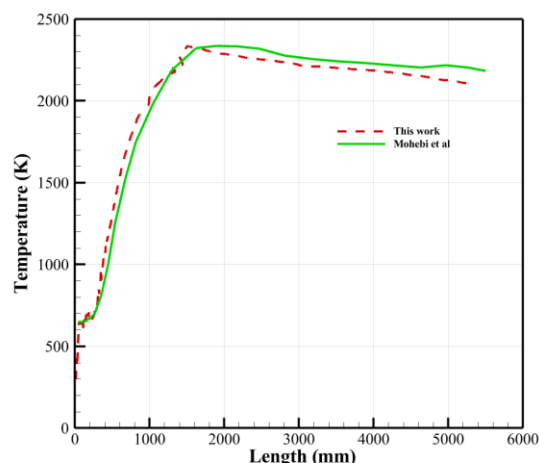
۲-۵-۲- استقلال از شبکه

برای اطمینان از دقت نتایج و کاهش وابستگی آنها به تراکم شبکه، آزمون استقلال از شبکه انجام شد. بدین منظور سه شبکه با تعداد سلول‌های مختلف (کم، متوسط و زیاد) تولید و شبیه‌سازی‌ها بر روی آن‌ها اجرا گردید. نتایج مربوط به دمای متوسط گازهای خروجی، توزیع سرعت محوری و غلظت گونه‌ها در مقاطع مشخصی از طول کوره مورد مقایسه قرار گرفت. مشاهده شد که اختلاف بین شبکه متوسط و ریز، در دمای متوسط و توزیع سرعت ناچیز بود، در حالی که زمان محاسباتی شبکه ریز به‌طور چشمگیری افزایش یافت. بر این اساس، شبکه با 3169200 سلول به عنوان شبکه نهایی انتخاب شد، چرا که از نظر هزینه محاسباتی بهینه بود و دقت مناسب را تضمین نمود. این موضوع نشان‌دهنده دستیابی به استقلال نتایج از شبکه و مناسب بودن شبکه انتخاب شده برای شبیه‌سازی احتراق در کوره دوار می‌باشد.

۳- اعتبارسنجی

به‌منظور ارزیابی دقت پیش‌بینی مدل CFD حاضر، نتایج شبیه‌سازی با داده‌های تجربی عملیاتی که از یک کوره سیمان در مقیاس صنعتی توسط محبی و همکاران [۱۶] گزارش شده است، مورد مقایسه و اعتبارسنجی قرار گرفت. معیار اصلی اعتبارسنجی، پروفیل دمای محوری در راستای خط مرکزی کوره است که یک شاخص کلیدی برای ارزیابی صحت مدل‌سازی پدیده‌های احتراق و انتقال حرارت محسوب می‌شود. این امر نشان می‌دهد، مدل‌سازی حاضر توانایی بازنمایی پدیده‌های اصلی احتراق و انتقال حرارت را دارا بوده و امکان استفاده از آن را به‌عنوان مبنایی معتبر برای تحلیل‌های پیشرفته و بهینه‌سازی شرایط عملکردی فراهم می‌سازد. در ادامه، نتایج اعتبارسنجی حاصل از این مطالعه ارائه می‌شود.

شکل ۷ مقایسه بین پروفیل دمای محوری شبیه‌سازی شده و داده‌های تجربی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشهود است، مدل انطباق بسیار خوبی در ناحیه احتراق اصلی (تقریباً 4 تا 10 متر از مشعل) از خود نشان می‌دهد. به‌طور خاص، دمای پیک شبیه‌سازی شده (2290 کلوین) در موقعیت محوری مشابهی با دمای پیک اندازه‌گیری شده (2300 کلوین) رخ می‌دهد که نشان‌دهنده اختلافی کمتر از 0.5% است. این تطابق عالی تأیید می‌کند که مدل به درستی سینتیک آزادسازی حرارت ناشی از احتراق و انتقال حرارت تشعشعی شدید در ناحیه شعله را پیش‌بینی می‌کند. در نواحی پایین‌دست کوره (پس از 4 متر)، مدل کاهش دمای سریع‌تری را پیش‌بینی کرده و در نتیجه دما را حدود 100 تا 150 کلوین کمتر تخمین می‌زند. این اختلاف قابل انتظار بوده و به یکی از فرضیات اصلی ساده‌سازی مدل، یعنی در نظر نگرفتن واکنش‌های پیچیده‌ی تشکیل فازهای کلینکر با شد. در کوره واقعی، واکنش‌های اگزوترمیک تشکیل کلینکر، منبع حرارتی قابل توجهی در سیستم ایجاد می‌کنند که دمای گاز را در بخش‌های انتهایی بالاتر نگه می‌دارد. از آنجایی که مدل حاضر صرفاً بر پدیده‌های فاز گاز متمرکز است، این منبع حرارتی در آن لحاظ نشده است.



شکل ۷- مقایسه نتایج مطالعه حاضر با نتایج تجربی

به طور کلی، فرآیند اعتبارسنجی نشان می‌دهد که مدل CFD حاضر، پدیده‌های فیزیکی غالب شامل اختلاط توربولانسی، آزادسازی حرارت احتراق و انتقال حرارت جابجایی و تشعشعی را، به‌ویژه در ناحیه بحرانی شعله، با دقت بالایی بازتولید می‌کند. تطابق بالا در ناحیه شعله، تأیید می‌کند که چارچوب عددی ایجاد شده یک ابزار معتبر و قابل اطمینان برای انجام مطالعه پارامتریک آتی در مورد تأثیر نرخ جریان هوای اولیه بر عملکرد حرارتی کوره می‌باشد.

۴- نتایج و بحث

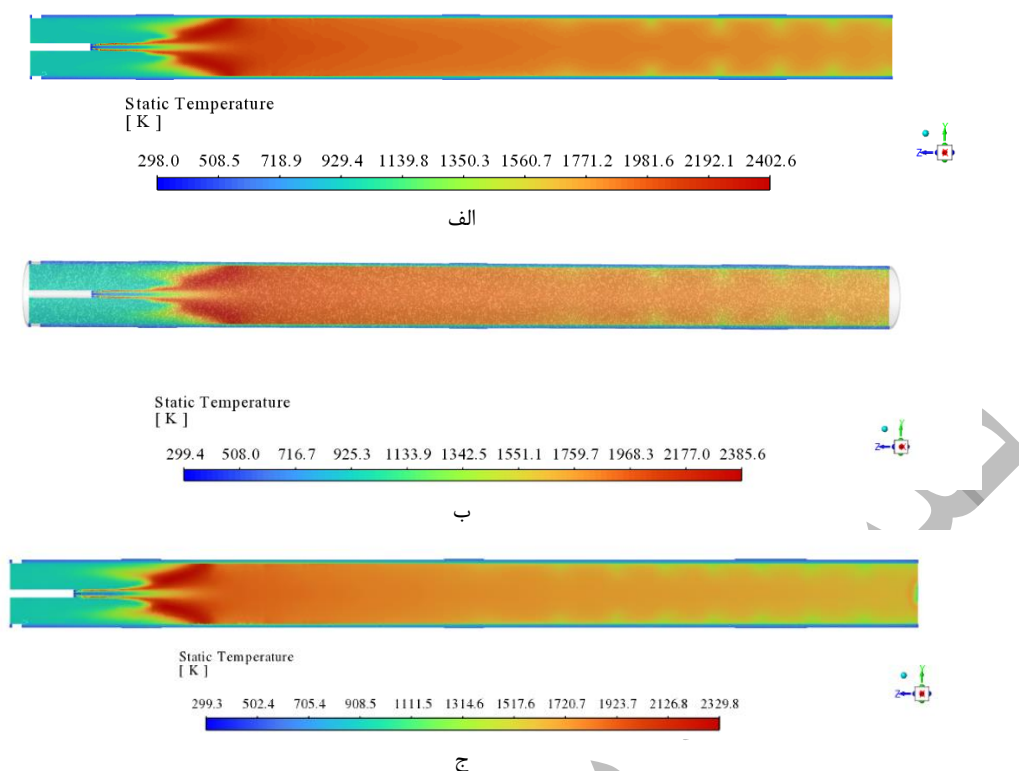
در این بخش، نتایج حاصل از شبیه‌سازی سه‌بعدی و پایای فرآیند احتراق غیرپیش‌آمیخته گاز طبیعی در کوره دوار سیمان ارائه و تحلیل می‌شود. همان‌طور که در بخش‌های پیشین اشاره شد، هدف اصلی این مطالعه، ارزیابی حساسیت میدان‌های ترموشیمیایی کوره نسبت به تغییرات دبی هوای اولیه مشعل است. بدین منظور، نتایج برای سه سناریوی عملیاتی مورد بررسی قرار گرفته‌اند: (۱) حالت پایه منطبق بر شرایط عملیاتی نرمال کارخانه، (۲) سناریوی کاهش ۲۰ درصدی دبی هوای اولیه و (۳) سناریوی افزایش ۲۰ درصدی دبی هوای اولیه. مقایسه جامع این سه سناریو، درک عمیقی از تأثیر الگوی جریان هوای اولیه بر ساختار شعله، آیرودینامیک جریان گاز، توزیع سه‌بعدی حرارت و میدان غلظت گونه‌های شیمیایی فراهم می‌کند. در ادامه، تأثیر این تغییرات بر هر یک از پارامترهای کلیدی سیستم به تفکیک مورد بحث قرار می‌گیرد.

۴-۱- توزیع دما

کانتورهای توزیع دما در مقطع طولی مرکزی کوره (شکل ۸) نشان می‌دهند که در هر سه سناریوی عملیاتی، بیشینه دمای گاز در ناحیه نزدیک به خروجی مشعل و در لایه‌های خارجی هسته شعله شکل می‌گیرد. با این وجود، مقدار بیشینه دما و گستره هندسی ناحیه داغ در این مقطع، به شدت تحت تأثیر دبی هوای اولیه و به تبع آن، شدت اختلاط آیرودینامیکی جریان قرار دارد.

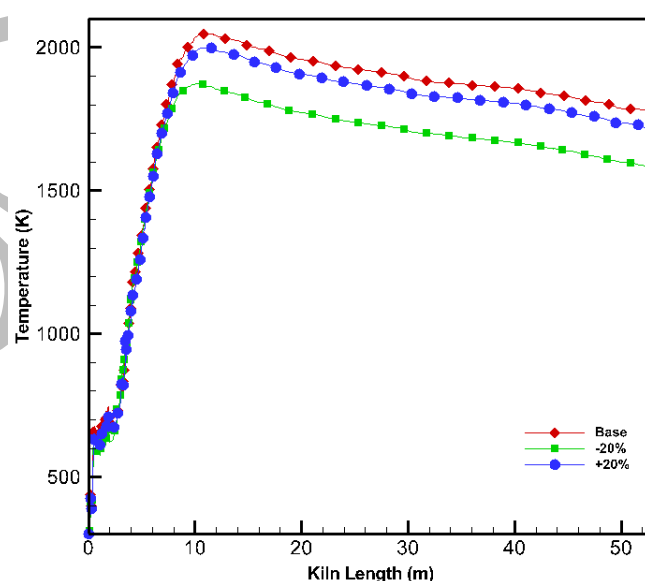
در حالت پایه (شکل ۸-الف)، بی‌شینه دمای شعله در این مقطع به حدود ۲۴۰۲ کلوین می‌رسد. در این حالت، ناحیه‌ای با دمای بالاتر از ۱۸۰۰ کلوین بخش وسیعی از طول ابتدایی کوره (حدود ۴۰ تا ۴۵ درصد طول کل) را در بر گرفته است. در کوره‌های سیمان، دمای ۱۸۰۰ کلوین عموماً به عنوان مرز ناحیه داغ و حداقل دمای لازم برای سینترینگ مطلوب کلینکر و اکسیداسیون کامل سوخت در نظر گرفته می‌شود. توزیع یکنواخت دما در مقطع طولی حالت پایه، نشان‌دهنده تعادل مناسب میان میدان سرعت، نرخ واکنش‌های احتراقی و اتلاف حرارت است که شرایط مطلوبی را برای انتقال حرارت تشعشعی به بستر کلینکر فراهم می‌آورد. با افزایش ۲۰ درصدی دبی هوای اولیه (شکل ۸-ب)، بیشینه دمای شعله به حدود ۲۳۸۵ کلوین افت می‌کند. این کاهش دما و کوتاه‌تر شدن طول ناحیه داغ، ناشی از رقیق‌شدگی (Dilution) شعله و افزایش ظرفیت حرارتی توده جریان ورودی است؛ پدیده‌ای که سبب می‌شود انرژی حرارتی آزاد شده در طول بیشتری از کوره توزیع گردد. از سوی دیگر، با کاهش ۲۰ درصدی دبی هوای اولیه (شکل ۸-ج)، بیشینه دمای مقطع افت بیشتری پیدا کرده و به حدود ۲۳۲۹ کلوین می‌رسد. کاهش مومنتوم هوای اولیه در این حالت، منجر به تضعیف اختلاط هوا و سوخت و افت نرخ واکنش‌های احتراقی می‌شود. این امر نه تنها طول ناحیه داغ را به شکل چشمگیری کاهش می‌دهد، بلکه با برهم زدن یکنواختی حرارتی، پتانسیل ایجاد تنش‌های حرارتی موضعی را افزایش می‌دهد.

به طور کلی، تغییر $\pm 20\%$ در صد در دبی هوای اولیه باعث تغییر حدود ۷۰ کلوین در دمای بی‌شینه و جابه‌جایی ناحیه دمای بالا در طول کوره می‌شود. این نتایج تأکید می‌کنند که کنترل دقیق دبی هوای اولیه برای مدیریت شدت شعله، یکنواختی حرارتی و کیفیت احتراق حیاتی است و می‌تواند به طور مستقیم بر کیفیت کلینکر، مصرف انرژی و طول عمر دیواره نسوز کوره اثرگذار باشد. این نتایج با داده‌های تجربی مشابه در ادبیات علمی هم‌راستا هستند. منابع کتابخانه‌ای بررسی شده نشان می‌دهد دمای احتراق گاز طبیعی در کوره‌ها در حدود ۲۳۰۰ کلوین است و این دما بستگی به میزان اختلاط هوا و سوخت، نسبت هوا به سوخت، تولید مونوکسیدکربن، وجود اکسیژن و غیره دارد [۲۱].



شکل ۸- توزیع دما در داخل کوره به ازای دبی‌های مختلف هوای اولیه؛ حالت پایه (الف)، +۲۰٪ هوای اولیه (ب) و -۲۰٪ هوای اولیه (ج)

علاوه بر بررسی دوبعدی در مقطع کوره، پروفیل توزیع دما دقیقاً بر روی خط مرکزی (Centerline) کوره (شکل ۹) رفتار ترمودینامیکی سیستم را در طول محور جریان روشن‌تر می‌سازد. مطابق این نمودار، دمای روی محور مرکزی پس از خروج از مشعل با شیب تندی افزایش یافته و در فاصله تقریبی ۱۰ متری از مشعل به بیشینه خود (حدود ۱۸۰۰ تا ۲۰۵۰ بسته به شرایط عملیاتی) می‌رسد. اختلاف دمای بیشینه در کانتورها (مقطع) و این نمودار خطی، نشان می‌دهد که به دلیل ساختار جریان و الگوی پاشش مشعل، داغ‌ترین نواحی احتراق مستقیماً روی محور هندسی کوره قرار ندارند، بلکه در لایه‌های برشی شعله شکل می‌گیرند. پس از عبور از ناحیه اصلی احتراق، دمای گازها بر روی خط مرکزی به دلیل انتقال حرارت به دیواره و بستر، با شیبی ملایم و یکنواخت تا انتهای کوره روند کاهشی به خود می‌گیرد. همان‌گونه که در پروفیل‌ها م‌شهود است، حالت پایه بالاترین سطح دمایی را در امتداد محور مرکزی حفظ می‌کند که نشان‌گر بهینه‌ترین شرایط احتراقی در میان حالات بررسی شده است.

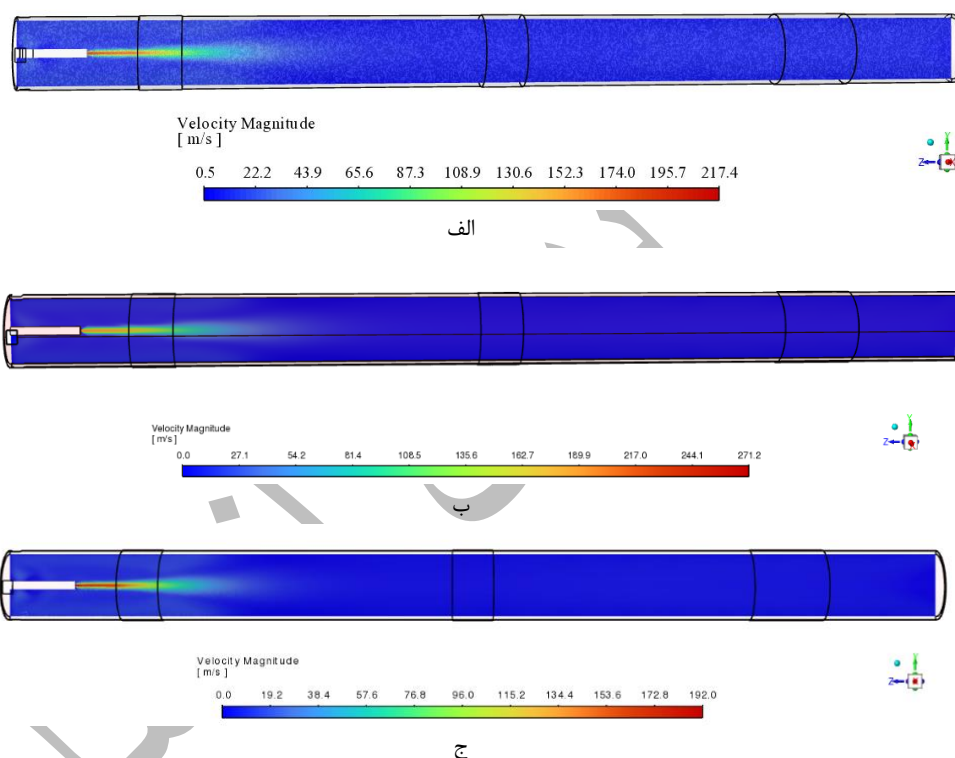


شکل ۹- تغییرات دمای گاز در طول کوره روی خطی در مرکز کوره از دهانه مشعل تا انتهای آن برای سناریوهای مختلف دبی هوای اولیه

۴-۲- توزیع سرعت

شکل ۱۰ کانتورهای سرعت جریان گاز در کوره دوار سیمان را برای سه شرایط عملیاتی (حالت پایه، افزایش ۲۰ درصدی و کاهش ۲۰ درصدی دبی هوای اولیه) نشان می‌دهد. میدان سرعت نمایانگر ساختار آیرودینامیکی جت مشعل و محرک اصلی فرآیند اختلاط سوخت و هوا است و نقشی کلیدی در تعیین پایداری شعله و الگوی توزیع حرارت ایفا می‌کند.

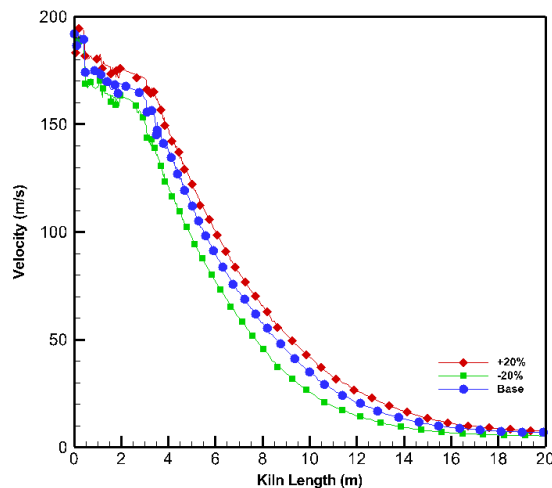
در حالت پایه (شکل ۱۰-الف)، یک جت محوری پر قدرت و پایدار در خروجی مشعل شکل می‌گیرد که بیشینه سرعت آن به حدود ۲۱۷ متر بر ثانیه می‌رسد. هرچه سرعت این جت تا مسافتی معادل ۱۰ الی ۱۵ درصد از طول ابتدایی کوره امتداد می‌یابد. پس از این ناحیه، مومنتوم جت در اثر اختلاط متلاطم و تبادل اندازه حرکت با هوای ثانویه و محیط اطراف به شدت افت کرده و سرعت جریان در نواحی پایین دست به کمتر از ۴۰-۵۰ متر بر ثانیه می‌یابد. این توزیع، نشان‌دهنده تعادل مناسبی بین مومنتوم تزریقی و پایداری شعله است. با افزایش ۲۰ درصدی دبی هوای اولیه (شکل ۱۰-ب)، سرعت خروجی جت به صورت چشمگیری افزایش یافته و بیشینه آن به حدود ۲۷۰ متر بر ثانیه می‌رسد. این افزایش شدید مومنتوم، باعث نفوذ عمیق‌تر هسته پر سرعت جت در طول کوره می‌شود. اگرچه این پدیده اختلاط سوخت و هوا و شدت آشفته‌گی را تقویت می‌کند، اما می‌تواند منجر به انتقال ناحیه اصلی احتراق به پایین دست کوره شده و راندمان انتقال حرارت در منطقه پخت ابتدای کوره را کاهش دهد. در مقابل، با کاهش ۲۰ درصدی دبی هوای اولیه (شکل ۱۰-ج)، بیشینه سرعت جت به حدود ۱۹۲ متر بر ثانیه افت می‌کند. افت مومنتوم باعث می‌شود هسته پر سرعت جت بسیار کوتاه‌تر شده و با سرعت بیشتری تضعیف گردد. کاهش شدت تلاطم در این حالت، فرآیند مکش هوای ثانویه را کند کرده و منجر به اختلاط ضعیف‌تر می‌شود که می‌تواند شعله‌ای بلندتر و اصطلاحاً تنبل (Lazy flame) ایجاد کند و پایداری آیرودینامیکی شعله را به خطر بیندازد.



شکل ۱۰- توزیع سرعت در طول کوره به ازای دبی‌های مختلف هوای اولیه؛ حالت پایه (الف)، +۲۰٪ هوای اولیه (ب) و -۲۰٪ هوای اولیه (ج)

شکل ۱۱ پروفیل سرعت خط مرکزی را از دهانه مشعل تا انتهای کوره نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، هوای اولیه با عبور از نازل‌های مشعل (که سطح مقطع کوچکی دارند) شتاب گرفته و با سرعت بسیار بالا به شکل یک جت متلاطم به درون کوره تزریق می‌شود. این سرعت بالا در دهانه مشعل باعث ایجاد تنش برشی شدید بین جت پر سرعت و جریان کندتر اطراف شده و هوای ثانویه را با شدت به درون منطقه واکنش مکش می‌کند. مقادیر سرعت برای هر سه حالت، با شیب تندی افت کرده و در فاصله حدود ۲۰ متری از دهانه مشعل، همگرایی پیدا کرده و به مقادیر نسبتاً یکسانی می‌رسند.

سهم هوای اولیه در ایجاد نیروی محرکه اختلاط (مومنتوم) بسیار حیاتی‌تر از هوای ثانویه است و نقش اصلی را در شکل‌دهی و ثبات شعله ایفا می‌کند. از سوی دیگر، هوای ثانویه علاوه بر تامین اکسیژن لازم برای جلوگیری از احتراق ناقص (و عدم تولید مونوکسید کربن)، با احاطه کردن جت مرکزی، نقش یک پوشش هوایی را ایفا می‌کند. این جریان هوای ثانویه، از پهن شدن بیش از حد شعله و برخورد مستقیم گازهای بسیار داغ با آجر نسوز دیواره کوره جلوگیری می‌کند؛ برخوردی که در صورت وقوع، منجر به شوک حرارتی و ریزش آستر نسوز کوره خواهد شد [۲۱].

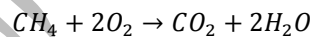


شکل ۱۱- تغییرات سرعت در طول کوره روی خطی در مرکز از دهانه مشعل تا فاصله ۲۰ متری آن برای سناریوهای مختلف دبی هوای اولیه

۳-۴- توزیع گونه‌های شیمیایی

در این مطالعه، تحلیل میدان گونه‌های شیمیایی بر توزیع متان (CH_4)، اکسیژن (O_2) و مونوکسید کربن (CO) متمرکز شده است؛ زیرا بررسی گرادینان غلظت واکنش‌دهنده‌های اصلی (O_2 و CH_4) نمایانگر دقتی از کیفیت اختلاط، طول نفوذ جت‌ها و مرزهای فیزیکی شعله است. از سوی دیگر، با توجه به حاکمیت رژیم احتراق سوخت‌غنی ($\lambda = 0.86$) در این شبیه‌سازی، مونوکسید کربن (CO) به عنوان مهم‌ترین محصول میانی احتراق، شاخصی بسیار حساس برای ارزیابی راندمان اختلاط محلی و شناسایی نواحی غنی از سوخت محسوب می‌شود. در واقع، ردیابی کانتورهای CO بهترین معیار برای درک میزان تأثیر تغییرات مومنتوم هوای اولیه ($\pm 20\%$) بر تکمیل فرآیند اکسیداسیون در لایه‌های برشی شعله است. در این راستا از بررسی محصولات نهایی نظیر CO_2 و H_2O صرف‌نظر شده است، چرا که به دلیل هم‌پوشانی بالای الگوی توزیع آن‌ها با میدان دما، اطلاعات آیرودینامیکی متمایزی فراتر از تحلیل‌های بخش پیشین ارائه نمی‌دهند. همچنین شایان ذکر است که رویکرد اصلی در این پژوهش، ارزیابی عملکرد آیرودینامیکی و ساختار ماکرو سکوپیک شعله است؛ لذا تحلیل جامع مکانیزم‌های تشکیل آلاینده‌های زیست‌محیطی (نظیر NO_x) و بررسی دقیق مقادیر انتشار، خارج از دامنه این مطالعه تعریف شده و به عنوان فاز توسعه‌یافته‌ی این کار، در پژوهش‌های آتی مؤلفین مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

بررسی میدان این گونه‌ها تصویر روشن‌تری از کیفیت اختلاط، راندمان احتراق و ساختار شعله ارائه می‌دهد. پیش از تحلیل کانتورها، به منظور درک بهتر رژیم احتراقی حاکم بر شبیه‌سازی، تحلیل استوکیومتری و محاسبه نسبت هوای اضافی (λ) ضروری است. واکنش کلی و استوکیومتری احتراق متان به صورت زیر است:



بر اساس استوکیومتری واکنش، برای احتراق کامل ۱ کیلوگرم متان به ۴ کیلوگرم اکسیژن نیاز است. با توجه به دبی سوخت ورودی کوره (0.99 kg/s)، میزان اکسیژن استوکیومتری مورد نیاز به شرح زیر محاسبه می‌شود:

$$\dot{m}_{O_2, stoich} = 0.99 \times 4 = 3.96 \text{ kg/s}$$

برای محاسبه دبی اکسیژن ورودی، هوای اولیه و ثانویه بر اساس کسر جرمی استاندارد اکسیژن در هوا ($Y_{O_2} = 0.233$) مورد بررسی قرار می‌گیرد. دبی هوای اولیه $6250 \text{ m}^3/\text{h}$ (معادل $1.736 \text{ m}^3/\text{s}$) است. با فرض چگالی هوا در شرایط ورودی (1.23 kg/m^3) داریم:

$$\dot{m}_{air, primary} = 1.736 \times 1.23 = 2.14 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{O_2, primary} = 2.14 \times 0.233 = 0.50 \text{ kg/s}$$

دبی هوای ثانویه نیز $35000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ (معادل $9.72 \text{ Nm}^3/\text{s}$) است. با در نظر گرفتن چگالی در شرایط نرمال (1.29 kg/m^3)، دبی جرمی اکسیژن موجود در هوای ثانویه برابر است با:

$$\dot{m}_{air, secondary} = 9.72 \times 1.29 \approx 12.54 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{O_2, secondary} = 12.54 \times 0.233 \approx 2.92 \text{ kg/s}$$

بنابراین، دبی کل اکسیژن در دسترس برای احتراق برابر با مجموع اکسیژن اولیه و ثانویه است:

$$\dot{m}_{O_2, total} = 0.50 + 2.92 = 3.42 \text{ kg/s}$$

بر این اساس، نسبت هوای اضافی (Excess Air Ratio) برای شرایط عملکردی شبیه‌سازی شده به دست می‌آید:

$$\lambda = \frac{\dot{m}_{O_2, total}}{\dot{m}_{O_2, stoich}} = \frac{3.42}{3.96} \approx 0.86$$

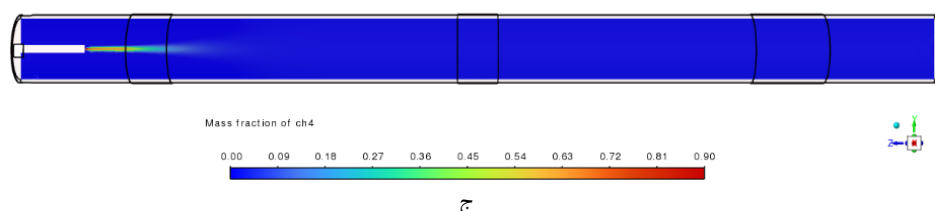
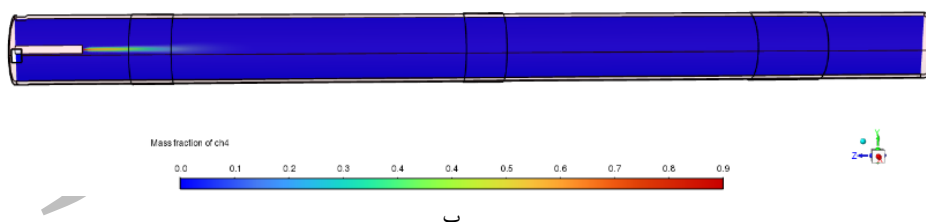
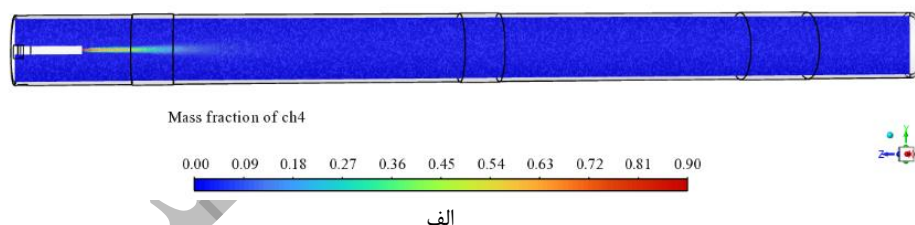
مقدار $\lambda < 1$ (نسبت هم‌آزری $\Phi > 1$) به وضوح نشان‌دهنده حاکمیت رژیم سوخت‌غنی (Fuel-Rich) به صورت سراسری در کوره است. در این شرایط، به دلیل کمبود ذاتی اکسیژن برای اکسیداسیون کامل تمام سوخت ورودی، تولید مونوکسید کربن (CO) در خروجی کوره اجتناب‌ناپذیر است. با این حال، باید توجه داشت که در مقطع ابتدایی کوره (محدوده شعله)، پدیده احتراق به شدت تحت تاثیر اختلاط محلی (Local Mixing) و آیرودینامیک ناشی از مومنتوم هوای اولیه قرار دارد. از این رو، ارزیابی نحوه توزیع گونه‌ها در ناحیه مجاور م‌شعل، معیاری عالی برای درک اثر دبی هوای اولیه بر کیفیت اختلاط، صرف‌نظر از کمبود کلی اکسیژن در سیستم است.

محاسبات استوکیومتری نشان می‌دهد که کوره در حالت پایه با نسبت هوا به سوخت $\lambda = 0.86$ (شرایط غنی از سوخت) عمل می‌کند. از آنجا که هوای اولیه تنها بخش کوچکی از کل هوای احتراق را تامین می‌کند، حتی با افزایش ۲۰ درصدی دبی آن، مقدار λ تنها به حدود ۰.۸۹ می‌رسد و ماهیت کلی سیستم همچنان غنی از سوخت باقی می‌ماند. باید توجه داشت که مقادیر دبی و شرایط مرزی در این شبیه‌سازی، دقیقاً منطبق بر شرایط عملیاتی واقعی و داده‌های میدانی یک کارخانه سیمان با ظرفیت ۱۰۰۰ تن در روز تنظیم شده است. در بسیاری از واحدهای صنعتی، به دلیل محدودیت‌های عملیاتی (مانند ظرفیت فن‌ها، نشتی‌های سیستم یا شرایط خنک‌کن کلینکر)، احتراق ممکن است از شرایط استوکیومتری ایده‌آل فاصله داشته باشد. بنابراین، هدف این مطالعه بهینه‌سازی تئوریک نسبت استوکیومتری نیست؛ بلکه هدف ارزیابی حساسیت آیرودینامیکی و حرارتی شعله در شرایط کارکرد واقعی کوره، نسبت به نوسانات رایج در دبی هوای اولیه ($\pm 20\%$) و تأثیر آن بر اختلاط محلی است.

۴-۳-۱- توزیع متان (CH_4)

شکل ۱۲ کانتورهای توزیع کسر جرمی متان (CH_4) را در مقطع طولی مرکزی برای سه سناریوی مختلف نشان می‌دهد. در حالت پایه (شکل ۱۲-الف)، بیشینه کسر جرمی متان در خروجی مشعل در حدود ۰.۹ است و هسته سوخت‌نسوخته (ناحیه غنی از متان) تا فاصله حدود ۳ الی ۴ متر در طول کوره امتداد می‌یابد؛ پس از آن به دلیل پیشرفت واکنش‌های احتراقی و اختلاط با هوا، مقدار آن به سرعت به سمت صفر میل می‌کند.

با افزایش ۲۰ درصدی دبی هوای اولیه (شکل ۱۲-ب)، طول هسته مرکزی متان به حدود ۲ الی ۳ متر کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده افت ۲۵ الی ۳۰ درصدی طول این ناحیه است. این پدیده مستقیماً ناشی از افزایش مومنتوم و شدت آشفته‌گی در خروجی مشعل است که منجر به اختلاط سریع‌تر سوخت و هوا و در نتیجه تسریع نرخ مصرف متان می‌شود. در مقابل، با کاهش ۲۰ درصدی دبی هوای اولیه (شکل ۱۲-ج)، هسته سوخت‌نسوخته به دلیل افت مومنتوم جت هوا، تا فاصله ۵ الی ۶ متری کشیده می‌شود که معادل افزایش ۴۰ الی ۵۰ درصدی طول این ناحیه است. کاهش دبی هوای اولیه باعث تضعیف شدت اختلاط در لایه‌های برشی شده و به ایجاد یک شعله کشیده و تنبل با نرخ واکنش کندتر می‌انجامد. بر این اساس، توزیع مکانی متان حساسیت بالایی به دبی هوای اولیه نشان می‌دهد و نتایج حاکی از آن است که حالت عملیاتی پایه، تعادل مناسبی را بین نرخ مصرف سوخت و طول ناحیه آزادسازی حرارت در کوره برقرار کرده است.



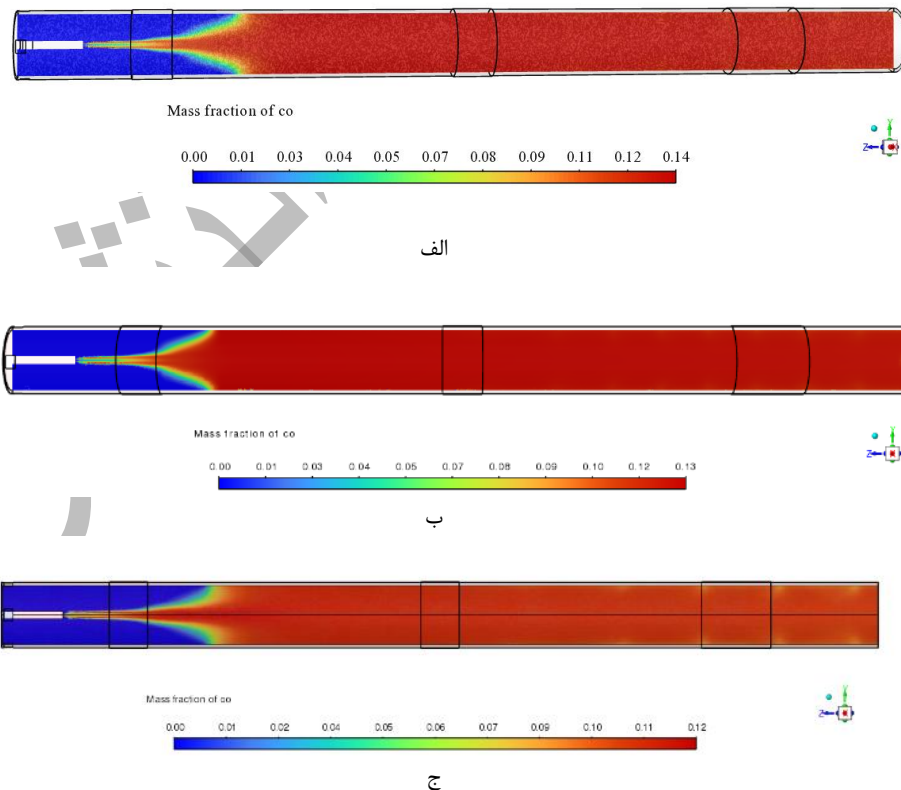
شکل ۱۲- توزیع کسر جرمی CH_4 در مقطع طولی مرکزی کوره به ازای دبی‌های مختلف هوای اولیه؛ حالت پایه (الف)، ۲۰٪+ هوای اولیه (ب) و ۲۰٪- هوای اولیه (ج)

۴-۳-۲- توزیع منوکسیدکربن (CO)

مونوکسید کربن (CO) به عنوان یک محصول میانی کلیدی در فرآیند احتراق هیدروکربن‌ها، شاخصی بسیار حساس برای ارزیابی کیفیت اختلاط محلی، دسترسی موضعی به اکسیژن و میزان پیشرفت واکنش‌ها محسوب می‌شود. همان‌طور که در مطالعات اخیر نیز تأکید شده است، توزیع این گونه شیمیایی به‌خوبی نمایانگر کیفیت اختلاط در لایه‌های برشی جریان و پیشرفت واکنش‌ها در طول کوره می‌باشد [۹]. به ویژه در شرایط عملکردی این مطالعه که کوره به صورت کلی در رژیم سوخت‌غنی ($\lambda = 0.86$) قرار دارد، بررسی توزیع CO اهمیت دوچندانی در شناسایی نواحی احتراق ناقص و ارزیابی عملکرد آیرودینامیکی مشعل دارد. شکل ۱۳ کانتورهای کسر جرمی این گونه را در صفحه تقارن کوره دوار سیمان برای سه سناریوی مختلف نشان می‌دهد. بررسی کیفی این کانتورها مشخص می‌کند که تغییرات دبی و مومنتوم هوای اولیه نقش اساسی در مکان تشکیل و گسترده‌گی حضور این گونه شیمیایی دارد؛ به طوری که با تغییر شدت اختلاط، طول و ضخامت ناحیه غنی از CO در شعله دستخوش تغییرات مشهودی می‌گردد.

در حالت پایه (شکل ۱۳-الف)، بیشینه کسر جرمی CO در ناحیه نزدیک به مشعل و ابتدای شعله مشاهده شده و در حدود ۰/۱۴ قرار دارد. این مقادیر ناشی از تشکیل CO در ناحیه غنی از سوخت (هسته جت) و قبل از تکمیل فرآیند اکسیداسیون است. در ادامه طول کوره، با بهبود اختلاط و افزایش زمان اقامت، CO به تدریج اکسید شده و مقدار آن در بخش‌های میانی به حدود ۰/۰۵ تا ۰/۰۷ کاهش می‌یابد که بیانگر پیشرفت واکنش‌های تکمیلی احتراق است. با افزایش ۲۰ درصدی دبی هوای اولیه (شکل ۱۳-ب)، دسترسی به اکسیژن در ناحیه ابتدایی شعله و شدت اختلاط آیرودینامیکی به طرز چشمگیری بهبود می‌یابد. افزایش مومنتوم جت باعث می‌شود مکش (Entrainment) هوای ثانویه و اختلاط لایه‌های برشی با شدت بیشتری صورت گیرد. در نتیجه، منحنی مربوط به این سناریو نشان می‌دهد که غلظت CO در بخش عمده‌ای از طول کوره نسبت به حالت پایه به طور محسوسی کاهش یافته است (حدود ۰/۰۶ تا ۰/۰۸). این رفتار فیزیکی نشان می‌دهد که اختلاط قوی‌تر، دسترسی سریع‌تر سوخت به اکسیژن را فراهم کرده و با تسریع روند مصرف سوخت، از تجمع CO جلوگیری می‌کند. با این حال، به دلیل افزایش قابل توجه مومنتوم جت، بخشی از سوخت پیش از اختلاط کامل به نواحی پایین‌دست رانده می‌شود که با توجه به رژیم کلی سوخت‌غنی کوره، منجر به تجمع نسبی CO در انتهای کوره می‌گردد.

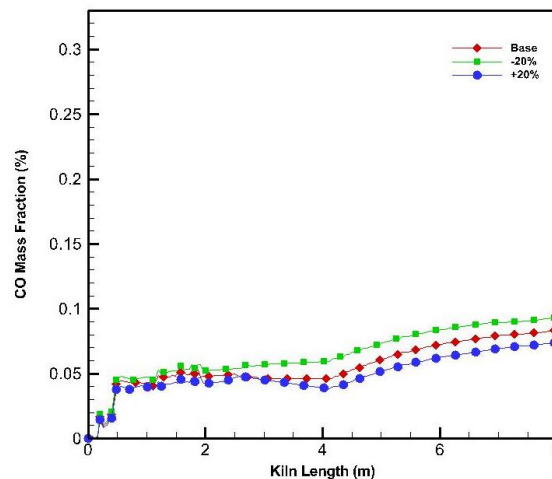
در مقابل همان‌طور که در نمودار توزیع محوری و کانتورها (شکل ۱۳-ج) به وضوح قابل ارزیابی است، در حالت کاهش ۲۰ درصدی دبی هوای اولیه، افت مومنتوم جت باعث تضعیف شدید اختلاط آیرودینامیکی میان لایه‌های سوخت و هوا می‌گردد. این اختلاط ضعیف منجر به کشیدگی ناحیه حضور CO و بیشینه شدن غلظت آن در نزدیکی مشعل (حدود ۰/۱۳) و قرارگیری در بازه ۰/۰۸ تا ۰/۱۰ در ناحیه شعله می‌شود که نسبت به حالت پایه افزایشی در حدود ۳۰ تا ۴۰ درصد نشان می‌دهد. این پدیده مستقیماً حاکی از تشدید احتراق ناقص محلی، تأخیر در تکمیل واکنش‌ها و کاهش کارایی اکسیداسیون نهایی سوخت است.



شکل ۱۳- کسر جرمی CO در کوره دوار به ازای دبی‌های مختلف هوای اولیه؛ حالت پایه (الف)، ۲۰٪+ هوای اولیه (ب) و ۲۰٪- هوای اولیه (ج)

با این وجود، برای درک دقیق‌تر، ارزیابی کمی این تغییرات در طول کوره و مقایسه شدت احتراق ناقص میان سناریوهای مختلف، توزیع محوری غلظت CO (روی خطی از دهانه مشعل تا انتهای کوره) استخراج شده است که نتایج آن در شکل ۱۴ ارائه شده است.

نتایج نشان می‌دهد که در یک محیط سوخت‌غنی، توزیع CO صرفاً تابع میزان هوای ورودی نیست، بلکه عمیقاً تحت تأثیر مومنتوم جت و آیرودینامیک جریان قرار دارد. ارزیابی کمی این سناریوها تأیید می‌کند که دبی هوای اولیه به عنوان یک اهرم کنترلی-آیرودینامیکی مؤثر عمل کرده و کنترل دقیق آن برای ایجاد تعادل میان اختلاط مناسب در ریشه شعله و جلوگیری از فرار سوخت نسوخته به پایین‌دست، نقشی کلیدی در مدیریت آلاینده‌ها و بهینه‌سازی راندمان ایفا می‌کند.

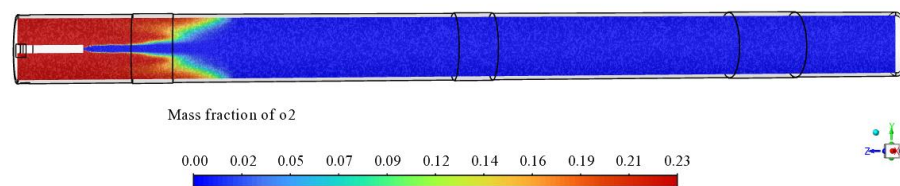


شکل ۱۴- درصد جرمی CO روی خطی از دهانه مشعل تا انتهای کوره

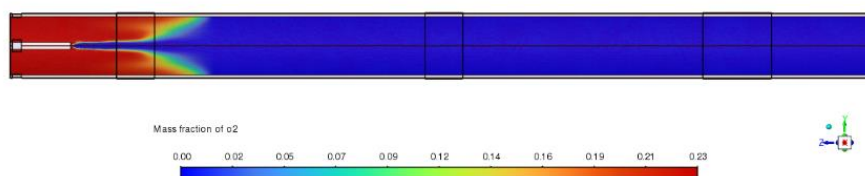
۳-۳-۴- توزیع اکسیژن (O_2)

شکل ۱۵ کانتورهای کسر جرمی O_2 و برای سه حالت عملیاتی نشان می‌دهند. توزیع اکسیژن آینه تمام‌نمای شدت اختلاط و تاییدکننده رژیم سوخت‌غنی حاکم بر کوره ($\lambda = 0.86$) است.

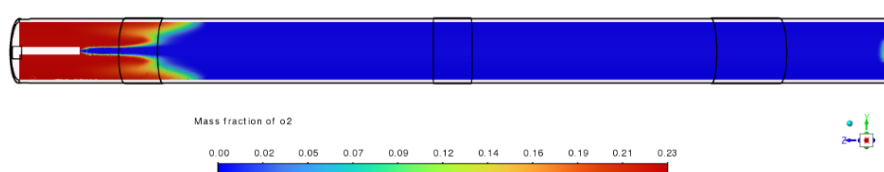
در حالت پایه (شکل ۱۵-الف)، کسر جرمی O_2 در جریان هوای ورودی (پیرامون مشعل) حدود ۰/۲۳ است. از آنجا که سیستم در رژیم سوخت‌غنی قرار دارد، اکسیژن ورودی در واکنش با سوخت به سرعت مصرف شده و در بخش‌های میانی و پایین‌دست کوره، غلظت آن به طور کامل به صفر میل می‌کند. کاهش غلظت اکسیژن به صفر در پایین‌دست، دلیل اصلی توقف فرآیند اکسیداسیون و باقی ماندن CO نسوخته در خروجی کوره است. تفاوت اصلی سناریوهای مختلف در دبی هوای اولیه، در میزان نفوذ شعاعی هوا به درون هسته سوخت نهفته است که به وضوح در نمودار خطی قابل مشاهده است.



الف



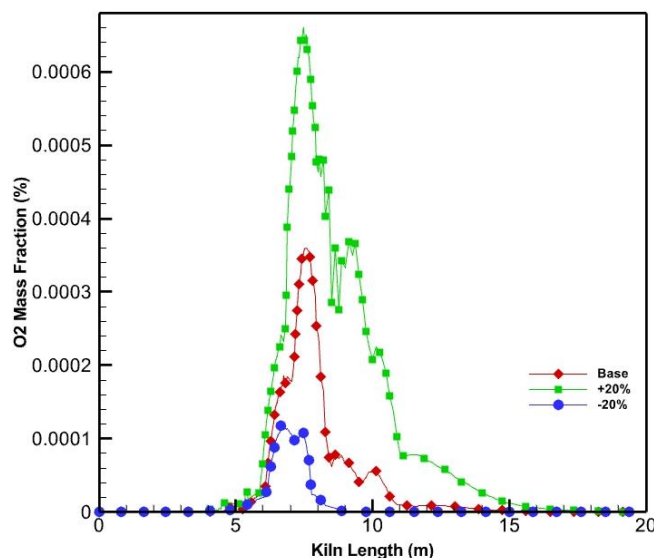
ب



ج

شکل ۱۵- کسر جرمی O_2 در کوره دوار به ازای دبی‌های مختلف هوای اولیه؛ حالت پایه (الف)، +۲۰٪ هوای اولیه (ب) و -۲۰٪ هوای اولیه (ج)

نمودار شکل ۱۶ حاوی اطلاعات بسیار مهمی از آیرودینامیک شعله است. از آنجا که خط ارزیابی از مرکز مشعل (محل تزریق سوخت خالص) عبور می‌کند، مقدار O_2 در ابتدای کوره (تا فاصله حدود ۵ متری) صفر است. با پیشروی جریان، هوا از لایه‌های بیرونی به سمت مرکز نفوذ می‌کند. حالت افزایش ۲۰٪ هوای اولیه بر خلاف تصور اولیه، افزایش هوای اولیه در این سیستم سوخت‌غنی منجر به ایجاد اکسیژن مازاد در پایین‌دست نمی‌شود، بلکه تنها مومنتوم جت هوا را افزایش می‌دهد. این افزایش مومنتوم باعث نفوذ شعاعی بسیار قوی‌تر هوا به داخل هسته سوخت می‌شود. در نتیجه، بیشترین مقدار اکسیژن به محور مرکزی می‌رسد. با این حال، به دلیل واکنش سریع، مقدار این اکسیژن نفوذی همچنان بسیار ناچیز است و نهایتاً کاملاً مصرف می‌شود. حالت کاهش ۲۰٪ هوای اولیه افت مومنتوم هوای اولیه باعث می‌شود هوا توان کافی برای غلبه بر مومنتوم سوخت و نفوذ شعاعی به مرکز شعله را نداشته باشد. در نتیجه، کمترین مقدار اکسیژن به محور مرکزی نفوذ می‌کند. این عدم نفوذ موفق اکسیژن به مرکز، دلیل اصلی طولانی شدن هسته سوخت CH_4 و احتراق ناقص موضعی در این سناریو است. به‌طور خلاصه، نتایج نشان می‌دهد که در شرایط سوخت‌غنی، دبی هوای اولیه به جای تغییر غلظت نهایی اکسیژن، به عنوان یک اهرم کنترل آیرودینامیکی عمل کرده و با تغییر نرخ اختلاط شعاعی، محل و شدت آزادسازی حرارت را در کوره تعیین می‌کند.



شکل ۱۶- درصد جرمی اکسیژن روی خطی از دهانه مشعل تا انتهای کوره در شبیه‌سازی کوره

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، شبیه‌سازی جامع سه‌بعدی جریان، انتقال حرارت و احتراق غیرپیش‌آمیخته در یک کوره دوار سیمان صنعتی با هدف بررسی اثر مومنتوم هوای اولیه (تغییرات $\pm 20\%$ دبی) بر آیرودینامیک شعله و میدان‌های ترموشیمیایی انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که دبی هوای اولیه به عنوان یک اهرم کنترلی-آیرودینامیکی کلیدی، نقش تعیین‌کننده‌ای در اختلاط و پایداری شعله ایفا می‌کند. بررسی‌ها حاکی از آن است که افزایش ۲۰ درصدی دبی هوای اولیه، بیشینه سرعت جت را به ۲۷۰ متر بر ثانیه افزایش داده و با نفوذ عمیق‌تر جت موجب تقویت اختلاط آشفته می‌شود؛ پدیده‌ای که طول هسته سوخت (CH_4) را با کاهش ۲۵ تا ۳۰ درصدی به ۲ تا ۳ متر تقلیل می‌دهد. در مقابل، کاهش ۲۰ درصدی هوا با افت سرعت تا ۱۹۲ متر بر ثانیه، باعث شکل‌گیری شعله‌ای بلندتر و تنبل‌تر شده و طول هسته سوخت را ۴۰ تا ۵۰ درصد (۵ تا ۶ متر) افزایش می‌دهد. تغییرات آیرودینامیکی یاد شده، تأثیر مستقیمی بر توزیع دما و مدیریت حرارتی کوره دارند. در حالت پایه، ناحیه داغ (دمای بالای ۱۸۰۰ کلوین) حدود ۴۰ تا ۴۵ درصد از طول کوره را پوشش می‌دهد که توزیع حرارتی مطلوبی برای فرآیند سینترینگ فراهم می‌کند. با افزایش دبی هوا، به دلیل رقیق‌سازی شعله و افزایش ظرفیت حرارتی، بیشینه دما از ۲۴۰۲ کلوین به ۲۳۸۵ کلوین کاهش می‌یابد. از سوی دیگر، افت مومنتوم در سناریوی کاهش هوا، به دلیل افت کیفیت اختلاط، موجب کاهش شدید طول ناحیه داغ و افت بیشینه دما به ۲۳۲۹ کلوین می‌شود که این امر می‌تواند خطر ایجاد تنش‌های حرارتی موضعی در نسوزها را به همراه داشته باشد. علاوه بر این، کیفیت احتراق نیز کاملاً تحت تأثیر این شرایط قرار دارد؛ به طوری که بهبود اختلاط در سناریوی افزایش هوای اولیه، اکسیداسیون را تسریع کرده و غلظت مونوکسید کربن (CO) را به حدود ۰/۰۶ تا ۰/۰۸ کاهش می‌دهد، در حالی که کاهش دبی هوا منجر به تسریع احتراق ناقص و افزایش غلظت CO تا مرز ۰/۰۸ تا ۰/۱۰ می‌گردد.

در مجموع، دستاوردهای این مطالعه اثبات می‌کند که تنظیم بهینه مومنتوم هوای اولیه (حالت پایه) برای ایجاد تعادل میان اختلاط مناسب، طول شعله استاندارد و توزیع یکنواخت دما در ناحیه پخت کلینکر کاملاً ضروری است. این یافته‌ها می‌توانند مبنای علمی و محاسباتی ارزشمندی برای طراحی نسل جدید مشعل‌های صنعتی و توسعه سیستم‌های کنترل هوشمند با هدف بهینه‌سازی راندمان مصرف انرژی و کاهش آلاینده‌ها در صنعت سیمان ارائه دهند.

فهرست علائم

c_p	گرمای ویژه در فشار ثابت، kJ/kg.K
H	انتالپی ویژه، J/kg
I	شدت تابش در موقعیت r و s ، $\text{W/m}^2.\text{sr}$
k	انرژی جنبشی آشفتگی، m^2/s^2
P_k	نرخ تولید انرژی جنبشی آشفتگی، W/m^3
p	فشار، Pa
S_i	نرخ تولید یا مصرف گونه i بر واحد حجم، $\text{kg/m}^3.\text{s}$
T	دمای محلی، K
U	بردار سرعت سیال، m/s
Y_i	کسر جرمی گونه i بدون بعد
فهرست علائم یونانی	
α	ضریب پخش حرارتی، m^2/s
ϵ	نرخ اتلاف انرژی جنبشی آشفتگی، m^2/s^3
μ	ویسکوزیته دینامیکی، Pa.s
μ_t	ویسکوزیته آشفتگی، Pa.s
ρ	چگالی، kg/m^3
σ_H	عدد پرانتل برای انرژی
σ_k	عدد پرانتل برای k
σ_e	عدد پرانتل برای ϵ
σ_s	ضریب پراکندگی تابش، m^2/s
C	ضرایب مدل آشفتگی
$\Gamma_{i,eff}$	ضریب پخش مؤثر گونه i ، kg/m.s
ϕ	تابع فاز بین جهتهای تابش
n	ضریب شکست

معادل انگلیسی	واژه فارسی در متن
Absorption Coefficient	ضریب جذب
Aerodynamics	آیرودینامیک
Alternative Fuels	سوخت‌های جایگزین
Buoyancy Effects	اثرات شناوری
Calcination	کلسیناسیون
Calcliner	کلساینر
Clinker	کلینکر
Coating Layer	لایه پوششی
Computational Fluid Dynamics (CFD)	دینامیک سیالات محاسباتی
Conjugate Heat Transfer	انتقال حرارت مزدوج
Dilution	رقیق‌شدگی
Discrete Ordinates (DO)	مختصات گسسته
Eddy Dissipation Model (EDM)	مدل اتلاف گردابه‌ای
Entrainment	مکش (سیال)
Equivalence Ratio	نسبت هم‌ارزی
Euler-Lagrange	اولر-لاگرانژ
Excess Air Ratio	نسبت هوای اضافی
Fuel-Rich	سوخت‌غنی
Grid Independence	استقلال از شبکه
Ideal Gas Law	قانون گاز ایده‌آل
Isotropic	همسانگرد
Lazy Flame	شعله تنبل
Mass Flow Inlet	ورودی دبی جرمی
Momentum	مومنتم
No-slip Condition	شرط عدم لغزش
Non-premixed Combustion	احتراق غیرپیش‌آمیخته
Oxy-fuel Combustion	احتراق اکسی-سوخت
Poly-Hexcore Mesh	شبکه چندوجهی-مکعبی (موزاییک)
Pressure Outlet	خروجی فشار
Radiative Transfer Equation (RTE)	معادله انتقال تشعشع
Refractive Index	ضریب شکست
Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS)	ناویر-استوکس با میانگین‌گیری رینولدز
Rotary Kiln	کوره دوار
Scattering Coefficient	ضریب پراکندگی
Shear Stress	تنش برشی
Sintering	سینترینگ
Specific Heat Capacity	ظرفیت گرمایی ویژه
Steady-state	حالت پایا
Turbulent Kinetic Energy	انرژی جنبشی آشفتگی
Velocity Inlet	ورودی سرعت
Weighted-Sum-of-Gray-Gases Model (WSGGM)	مدل مجموع وزنی گازهای خاکستری
Zero Gauge Pressure	فشار نسبی صفر

- [١] B. Poggianti, R. Palazzolo, and C. Moliner, "Rotary kiln simulation for energy recovery: The precalciner cement kiln case," *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 54, p. 102806, 2024.
- [٢] S. Wang, Lu, J., Li, W., Li, J. and Hu, Z., "Modeling of pulverized coal combustion in cement rotary kiln.," *Energy & Fuels*, vol. 20(6), pp. pp.2350-2356., 2006.
- [٣] H. Kritzinger and T. Kingsley, "Modelling and optimization of a rotary kiln direct reduction process," *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, vol. 115, no. 5, pp. 419-424, 2015.
- [٤] Z. Liu, Z. Wang, M. Yuan, and H. Yu, "Thermal efficiency modelling of the cement clinker manufacturing process," *Journal of the Energy Institute*, vol. 88, no. 1, pp. 76-86, 2015.
- [٥] C. Pieper, S. Wirtz, S. Schaefer, and V. Scherer, "Numerical investigation of the impact of coating layers on RDF combustion and clinker properties in rotary cement kilns," *Fuel*, vol. 283, p. 118951, 2021.
- [٦] C. Pieper, B. Liedmann, S. Wirtz, V. Scherer, N. Bodendiek, and S. Schaefer, "Interaction of the combustion of refuse derived fuel with the clinker bed in rotary cement kilns: A numerical study," *Fuel*, vol. 266, p. 117048, 2020.
- [٧] T. P. Bhad, Sarkar, S., Kaushik, A., & Herwadkar, S. V. , "CFD Modeling of a cement Kiln with multi channel burner for optimization of flame profile," *In Proceedings of the Seventh International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries.*, 2009.
- [٨] J. Hercog *et al.*, "Pilot testing and numerical simulations of the multifuel burner for the cement kiln," *Fuel*, vol. 342, p. 127801, 2023.
- [٩] D. M. Cecílio, M. Mateus, and A. I. Ferreira, "Industrial rotary kiln burner performance with 3D CFD modeling," *Fuels*, vol. 4, no. 4, pp. 454-468, 2023.
- [١٠] M. Ditaranto and J. Bakken, "Study of a full scale oxy-fuel cement rotary kiln," *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 83, pp. 166-175, 2019.
- [١١] M. Wang, B. Liao, Y. Liu, S. Wang, S. Qing, and A. Zhang, "Numerical simulation of oxy-coal combustion in a rotary cement kiln," *Applied Thermal Engineering*, vol. 103, pp. 491-500, 2016.
- [١٢] H. F. Elattar, E. Specht, A. Fouda, and A. S. Bin-Mahfouz, "Study of parameters influencing fluid flow and wall hot spots in rotary kilns using CFD," *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 94, no. 2, pp. 355-367, 2016.
- [١٣] S. Wirtz, C. Pieper, F. Buss, M. Schiemann, S. Schaefer, and V. Scherer, "Impact of coating layers in rotary cement kilns: Numerical investigation with a blocked-off region approach for radiation and momentum," *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 15, p. 100429, 2020.
- [١٤] A. G. Straatman and C. M. Csernyei, "Numerical modelling of a rotary cement kiln with improvements to shell cooling," 2016.
- [١٥] H. Fateh Nobandegani and K. Mazaheri, "Investigation of Combustion Models in Numerical Simulation of Cement Rotary Kiln," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 15, no. 7, pp. 199-208, 2015.
- [١٦] D. Ndiaye, G. Leyssens, M. Schönnenbeck, and F. Lardet, "Simulation of the bed profile, axial velocity and residence time in a rotary kiln," *Powder Technology*, vol. 204, no. 1, pp. 131-137, 2010.
- [١٧] H. Shahin, S. Hassanpour, and A. Saboonchi, "Thermal energy analysis of a lime production process: Rotary kiln, preheater and cooler," *Energy Conversion and Management*, vol. 114, pp. 110-121, 2016.
- [١٨] M. C. Siame, T. Zvarivadza, M. Onifade, I. N. Simate, and E. Lusambo, "Dynamic simulation of heat distribution and losses in cement kilns for sustainable energy consumption in cement production," *Sustainability*, vol. 17, no. 2, p. 553, 2025.
- [١٩] C. Ryan, C. B. C. Lemos, and R. C. V. Coelho, "Coupling a 2D axisymmetric CFD model with a 1D bed model for simulating calcination and heat transfer in lime rotary kilns," *Applied Thermal Engineering*, vol. 194 ,p. 117070 2021.
- [٢٠] A. Alcaide-Moreno, J. C. Ruiz, M. A. Gómez, and F. J. Gutiérrez, "3D CFD modelling of a cement rotary kiln: Combustion of alternative fuels and 3D flight of particles," *Fuel*, vol. 310, p. 122452, 2022.
- [٢١] P. A. Alsop, *Cement plant operations handbook: for dry process plants*. Tradeship Publications Ltd., 2007.